

せん断変形を伴う軟弱地盤の圧密変形予測に関する研究

高橋 真一 西林 清茂
上野 孝之

Studies on Consolidation Analysis with Shear Deformation in Soft Ground

Shin-ichi Takahashi Kiyoshige Nishibayashi
Takayuki Ueno

Abstract

Two things are important to quantitatively evaluate settlement behaviors of soft ground. One is investigation of the stress-strain relationship of soil elements and the other is investigation of the composite characters of these layers. To evaluate the effects of these two investigations, numerical consolidation analyses were performed and the following results obtained.

① In the case of using the modified Cam-clay model, strength parameters (M , κ , λ) have relevance to initial stress on condition of K_0 consolidation. When data input is done without the above relationship, it can not correct the e -log p relationship.

② The composite condition of the layers affect the consolidation calculation.

概 要

部分載荷条件下の軟弱地盤の応力変形解析の精度向上には、土要素の応力～ひずみ関係の適切な評価と、実地盤の層構成の適切な把握が共に重要である。この2つの観点から圧密下挙動のモデル解析を行い、次の結論を得た。

① 弾塑性構成モデル（修正カム・クレイ・モデル）を用いた K_0 圧密解析では、適正な沈下量を得るために必要な入力定数 (M , K_0 値) の範囲がある。その範囲外の入力条件を用いると、圧密量の計算結果に90～30%の誤差を生じ、留意する必要がある。

② 粘土層内に介在する中間層の透水係数は、圧密速度に影響するため透水性の評価は重要である。具体的には層厚1mの場合、透水係数が 10^2 倍で1.3倍、 10^4 倍で4倍の速度となり、影響度合いは大きい。

1. はじめに

軟弱地盤では、荷重に伴って、荷重直後に非排水せん断変形と時間遅れを伴って圧密変形が生じる。特に道路盛土のように荷重幅が比較的小さい場合や盛土法尻部では、部分載荷条件下となる。このような応力状態での変形解析の精度向上には、土要素の応力～ひずみ関係の適切な評価と実地盤の地盤構成の適切な評価が共に重要である。

これまで、解析技術として解析コードの整備は進んでいるものの、精度よい解析を進めるために必要な適切な材料定数の選定法など留意点は、よく整理されていないのが現状である。この論文は、圧密変形挙動を対象として、初期応力状態 (K_0 値) と材料定数 (M , κ , λ) の組合せと洪積粘土層を対象に層構成のモデル化における排水層の設定の影響についてシミュレーション解析を行い、精度良い解析を進めるための留意点について論じたものである。

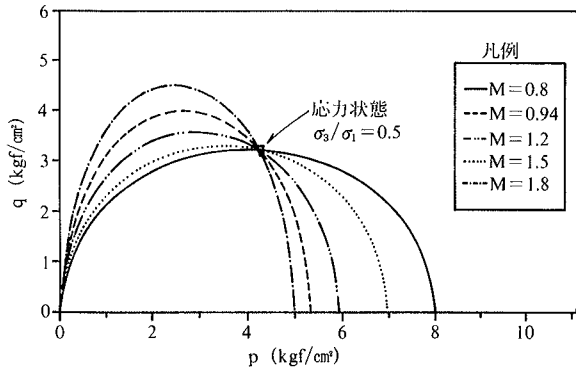
2. 修正カム・クレイ・モデルを用いた K_0 圧密解析

2.1 修正カム・クレイ・モデルを用いた K_0 圧密解析の問題点

粘性土を対象とした代表的な構成式である修正カム・クレイ・モデルを用いて一次元圧密解析を行う場合、解析に必要な初期応力条件 (K_0 値) と強度パラメータ (M , κ , λ) は、Roscoe (ロスコー) らりが誘導したように、決して各々のパラメータを独立して決定することはできない。しかし、この誘導されたパラメータの組合せでは一次元圧密の解析精度は満足できるが、圧密変形の中で重要な非排水変形を精度良く予測し得ない可能性が生じ、できる限り全てのパラメータは試験結果に近い値を用いることが望まれる。

2.2 修正カム・クレイ・モデル

修正カム・クレイ・モデルは、ロスコーらによって提案された主として粘性土を対象とした弾塑性構成モデルである。このモデルと地盤中の間隙水の流れを連立させ



図一 修正カム・クレイ・モデルの降伏曲面 (K₀=0.5の場合)

表一 粘土試料の物理特性

P _l	82%	C _c	2.0
e ₀	2.135	C _s	0.15
P ₀	2.0 kgf/cm ²	P _c	5.8 kgf/cm ²
		φ'	28.2°

表二 K₀ 圧密解析入力定数

	Case 1 試験値	Case 2 M 優先	Case 3 K ₀ 優先
M	1.213	1.213	1.778 ¹⁾
K ₀	0.45	1.65 ¹⁾	0.45
ν ²⁾	0.31	0.39	0.31
e ₀	2.135		
P _c	5.8 kgf/cm ²		
λ, κ ³⁾	λ=0.868 κ=0.065		
荷重	P _{z0} : 2 kgf/cm ² P _{zf} : 9 kgf/cm ²		

1) 式(1)から算出
2) ν=K₀/(1+K₀)
3) λ=0.434C_c, κ=0.434C_s

ることによって、土と水の2相モデル地盤の弾塑性土・水連成解析（非排水せん断解析、圧密解析等）を行うことができる。

降伏曲面や塑性ポテンシャルの特徴を把握することは、その構成式を利用するにあたって特徴を把握することにつながり、非常に重要なことである。しかし、実際には降伏曲面は応力状態によって三次元的に色々と変化するため、なかなか単純には把握できない。応力状態は一般には三次元であるが、降伏曲面を把握しやすいように、図一に、応力比 (σ₃/σ₁)=0.5における降伏曲面を p-q 面上に示す。同じ応力状態においても強度パラメータ M が大きいほど降伏曲面の円形の形状が p 軸の半径に比べ q 軸の半径が大きくなり、強度パラメータ M の値によって降伏曲面の形状が大きく異なることがわかる。

2.3 K₀ 圧密試験

K₀ 圧密試験は、大阪南港埋立地から採取した不覚乱試料（採取深度 OP-48 m）を用い、三軸試験機を利用する方法²⁾で行った。表一に主な土質特性を示す。K₀ 値は、図二に示すように、圧密降伏応力 P_c 以下では K₀=0.4程度、P_c 以上では K₀=0.4~0.5を示している。

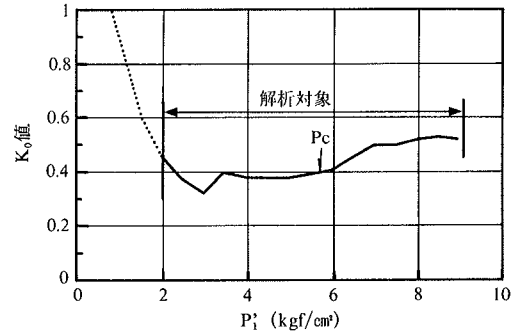
2.4 K₀ 圧密状態におけるパラメータの関係

修正カム・クレイ・モデルを用いた K₀ 圧密状態では、圧密中の応力状態 (η=q/p=一定) と圧密中に発生する横ひずみがゼロ (δ₃=0) の2つの条件から次式が成立する¹⁾。

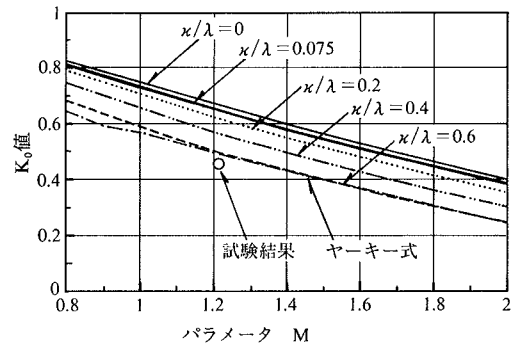
$$\eta = \frac{1}{2} \left[-3 \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right) + \sqrt{9 \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right)^2 + 4M^2} \right] \dots\dots (1)$$

(なお、K₀ と η の関係は、K₀ = (3-η)/(2η+3))

(1)式を満足させるために、解析に必要な M, κ, λ, K₀ 値の設定で制限を受けることが実際には多い。



図二 K₀ 圧密試験結果 (K₀ 値)



図三 M~K₀ 値関係

図三は、K₀ 圧密試験結果、(1)式を満足する関係、および経験式であるヤーキー式の関係を示したものである。試験結果はヤーキー式に近い。(1)式の関係から求められる K₀ 値は、試験結果に比べて大きい。κ/λ の値が大きくなると(1)式を満足する K₀ 値は小さくなり、κ/λ=0.6で試験結果に等しくなる。以上のことより(1)式を満足する関係を得るためにパラメータとして、K₀ 値, M, κ/λ のいずれかを試験結果から大きく評価することが必要で、特に過圧密域から正規圧密域まで e-logp を満足させる場合には K₀ または M のいずれかの補正に限定される。

2.5 K₀ 圧密解析

解析は、単位長さの立方体要素を用い、底面の全変位と側面の水平変位を拘束し、上面から載荷する K₀ 圧密定常解析を行った。解析条件は、表二、図四に示すように、全てのパラメータを試験結果から決定した場合 (Case 1)、(1)式を満足する K₀ 値を用いる場合 (Case 2)、(1)式を満足する M を用いる場合 (Case 3) である。

図五に e-logp₁ 関係を示す。Case 1 は、試験結果に比べて正規圧密領域における間隙比の減少が少ないが、Case 2, Case 3 では、過圧密、正規圧密領域とも試験結果と良く一致している。

図六は、p-q 面上で応力経路を示したものである。Case 3 が、試験結果の応力経路に比較的良く近似しているが、Case 1, 2 は試験結果と異なった応力経路を示している。Case 1 は、Case 3 と同じ弾性定数 (κ, ν) であることから必然的に弾性範囲内で同じ応力経路を示す。しかし、塑性域 (正規圧密領域) では、Case 3 が弾性域とほぼ同じ勾配で応力増加するのに対して、Case 1 は

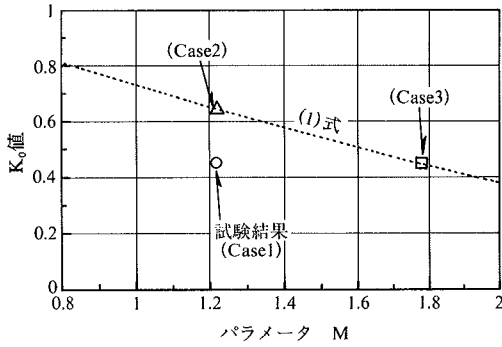


図-4 解析条件 (K_0 値-M 関係)

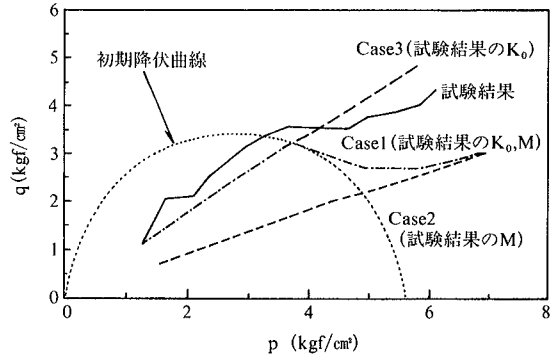


図-6 解析結果 (p - q 関係)

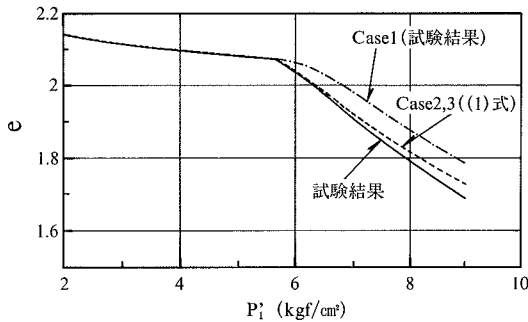


図-5 解析結果 (e - $\log p_1$ 関係)

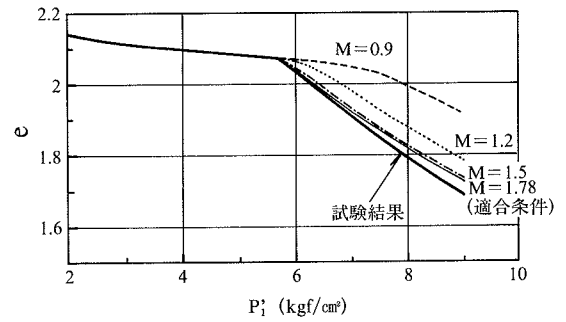


図-7 解析結果 (e - $\log p_1$ 関係)

Case 2 の結果に漸近している。Case 2 の応力経路は、初期状態から試験結果と異なるものの、Case 3 と同様に弾性域、塑性域でほぼ同じ勾配の応力増加となっている。このことから、(1)式を満足しない場合には初期降伏以降の応力経路で直線性が失われるため、 e - $\log p_1$ 関係の差が生じたと考えられる。

図-7 は、Case 3 の κ , λ , K_0 値を用い、 M を通常想定される範囲内で変化させて解析した e - $\log p_1$ 関係である。(1)式で求めた M 以外にも10%程度の範囲内であれば試験結果を良く表している。しかし、約10%以上異なる M の値を用いた解析結果は試験結果に比べて正規圧密領域の沈下量が小さくなる。 M が±10%程度の差であれば降伏曲線に達した時の応力状態と(1)式で求められる応力状態の差異が実用的に小さいことを意味している。

図-8 は、 κ , λ には Case 3 の値を、 K_0 値、 M には通常想定される範囲内の値を用いて解析を行い、試験の e - $\log p_1$ 関係が近似できるパラメータの範囲を求めたものである。 e - $\log p_1$ 関係を実用的に近似できるパラメータの組合せは、(1)式の関係を中心とする範囲で示されている。修正カム・クレイ・モデルを用いた K_0 圧密解析で、実用的に精度良い e - $\log p_1$ 関係を近似するには、図中の範囲内となっているかどうかの確認が重要となる。

3. 洪積粘土層の層構成と圧密沈下に及ぼす影響

3.1 問題点の整理

関西国際空港などで代表される大規模な海上埋立地の建設や、埋立地を利用した大型建造物の建設など荷重の

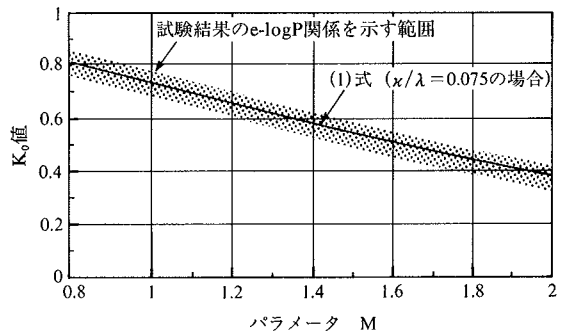


図-8 解析結果 (K_0 値-M 関係)

増加に伴い、深層の洪積粘土層で大きな沈下挙動が生じることが多くなっている。洪積粘土層の沈下問題に関しては、これまでいくつかの知見^{3),4)}がまとめられているが、これまで洪積粘土層の沈下挙動を検討する必要性が少なかったことから、エレメントの力学特性や地盤構成に関する工学的な情報が沖積粘土層に比べて少ない。しかも、洪積粘土層は沖積粘土層に比べて不均質な層構成であることが多いと一般的に言われており、精度良い沈下予測のためには排水層を適切に設定することが重要な課題⁵⁾となっている。ここでは、洪積粘土層の排水条件を精度良く把握するために、

- ① 洪積粘土層の連続的な不覚乱試料採取
- ② 物理試験、圧密試験を行い洪積粘土層の詳細な層構成に対応する物性および排水層の存在の検討
- ③ モデル地盤の圧密計算を行い排水層の排水能力が圧密速度に及ぼす影響の検討を行った。



図-9 土質調査位置図

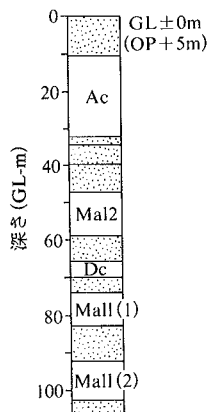


図-10 土質柱状図

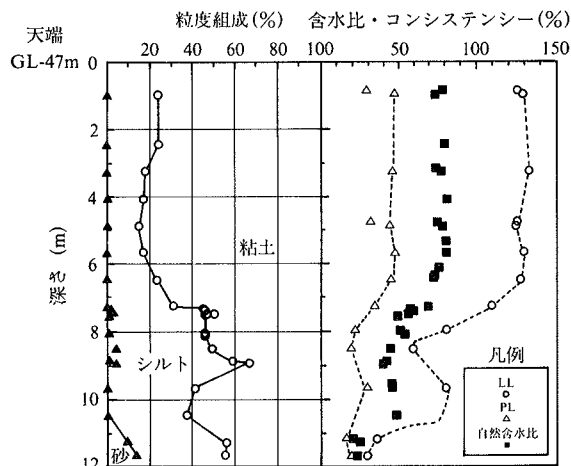


図-11 土性図 (Ma 12)

3.2 乱さない試料の採取と土質特性

3.2.1 試料の採取位置および柱状図 試料は、大阪南港埋立地の一面で深度 GL-47~103 m から採取した洪積粘性土である。図-9 に採取位置を、図-10 に柱状図を示す。柱状図には、地質学的調査結果に基づいて決定した粘土層名を付記した。GL-68 m 付近の粘土層以外はすべて海成粘土層で、それぞれ Ma 12, Ma 11(1), Ma 11(2) 層に相当する。各粘土層では連続的にデニソンサンプリャーを用いて試料採取を行い、室内土質試験を行った。

3.2.2 Ma 12 層 図-11 に Ma 12 層の土性図を示す。土性は上部層と下部層に大きく分けられ、上部層約 7 m は粘土を多く含む比較的一様な高塑性の粘土層、下部層はシルトと粘土の互層で比較的低塑性の粘土層となっている。上部層から下部層にかけての土性の変化は粒度組成から見て連続的で、その境界付近には特に砂分が多く排水層と考えられる部分はない。

3.2.3 Ma 11(1)層 図-12 に Ma 11(1) 層の土性図を示す。Ma 11 (1) 層天端から 6 m 付近で砂分が多い部分 (中間層) が存在し、この層を境に上部層と下部層の大きく 2 層に分けられる。厚さ約 1 m の中間層は、その層内で砂分含有量が急激に変化し、最大 43% に達する。上部層、下部層は比較的高塑性粘土であるが、各層ともコンシステンシー特性が中間層に向かって高塑性から低塑性に変化している。上部層の中央でコンシステンシー大きくなる分布は大阪港周辺の沖積粘土層 Ma 13 で見られる中膨らみの状態と似ている。

3.2.4 Ma 11(2)層 図-13 に下部の一部に淡水成粘土を含む Ma 11(2) の土性図を示す。粘土層の層天端から 7 m 付近および 10 m 付近に砂分が多い部分 (中間層) が存在し、この層を境に上部、中部、下部層の大きく 3 層に分けらる。上部層は高塑性粘土、中部、下部層は低塑性粘土である。

3.3 層構成と圧密計算における問題点

土性分布の検討から得られた地盤の特徴をまとめると以下の通りである。

- ① Ma 12, Ma 11(1) は 2 層, Ma 11(2) は 3 層に大きく層構成が分けられる多層地盤を形成している。
- ② Ma 11(1), Ma 11(2) では層内に砂分を多く含む部

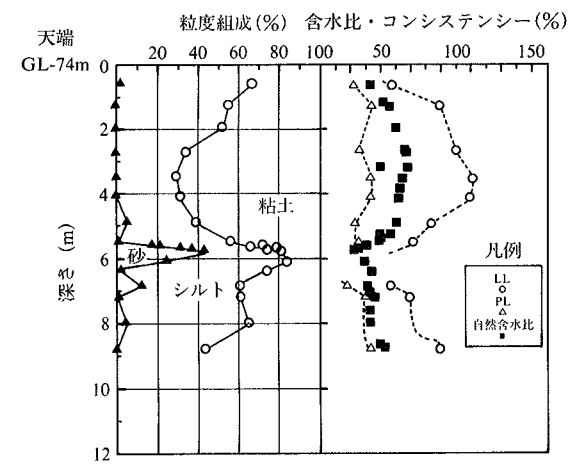


図-12 土性図 (Ma 11 (1))

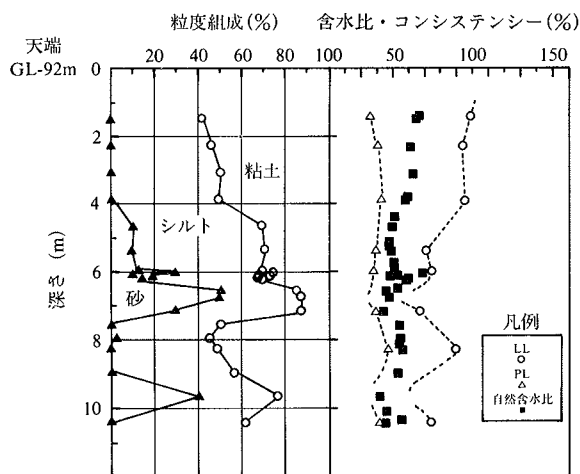


図-13 土性図 (Ma 11 (2))

分 (中間層) が存在している。

圧密計算でこれらの特徴を反映するためには、深さごとの地盤定数の設定、中間層の排水条件の適切な評価が重要となる。

図-14 に、透水係数の分布を示す。図中の値は、圧密試験から得られた透水係数 k のうち土被り圧に対応する値と、一部中間層部分では D₂₀, D₁₀ の粒径を用いて推定した値である。粘土層の中央付近に存在する砂分が多

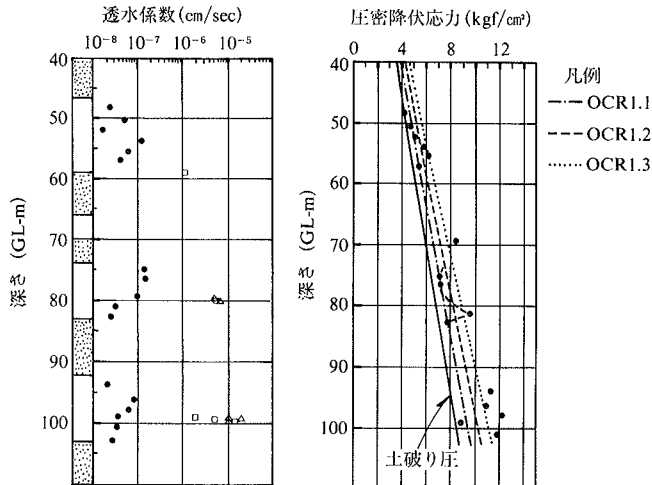


図-14 透水性の分布 図-15 圧密降伏応力の分布

表-3 解析入力定数

	mv (cm ² /kgf)	E (kgf/cm ²)	ν	K ₀	k (cm/sec)
埋立層		200	0.333	0.5	
Ac 層	2.7×10 ⁻²	25	0.333	0.5	*
砂礫層		500	0.333	0.5	
Ma 12 層	9.4×10 ⁻³	70	0.333	0.5	*
砂礫層		1,500	0.333	0.5	
Dc 層	7.4×10 ⁻³	90	0.333	0.5	*
砂礫層		1,500	0.333	0.5	
Ma 11 (1) 層	7.4×10 ⁻³	90	0.333	0.5	3.4×10 ⁻⁸
中間層	//	//	//	//	3.4×10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁴
砂礫層		2,000	0.333	0.5	
Ma 11 (2) 層	3.2×10 ⁻³	209	0.333	0.5	1.9×10 ⁻⁸
載荷面直下		2.1×10 ⁸	0.333	0.5	

備考 E=(1+ν)(1-2ν)/mv(1-ν) * : 圧密考慮せず
K₀=ν/(1-ν)

い中間層は、他の粘土部分に比べて透水係数が10²~10³倍程度大きい。粘土分を含む土質に対して粒径から透水係数を推定する方法には問題があることが指摘⁶⁾されておりその絶対値には問題を含んでいるものの、相対的には透水係数が大きいことを示しており、中間層が排水層となり得ることが考えられる。

図-15は、圧密降伏荷重 Pc の深度分布である。Ma 11 (1) の Pc の分布状態は、中間層に近い程大きくなる傾向が認められ、中間層が排水層として機能している可能性がこの結果からも説明できる。

3.4 モデル地盤による沈下解析

3.4.1 モデル地盤と解析条件 通常、圧密計算の排水条件は、透水係数が無限に大きいと仮定する排水面、あるいはまったく排水を許さない非排水面とすることが多い。しかし、Ma 11(1), Ma 11(2) 層内に存在する中間層では、必ずしも排水条件が明確でない。そのため、中間層の透水性の大きさが圧密速度へ与える影響を定量的に検討するため、中間層の透水性と層厚をパラメータとした沈下解析を行った。

モデル地盤は、図-16に示すように深さ 103 m、半径 150 m の軸対象モデルである。中間層は、代表として Ma 11(1) 層内のみを設定した。載荷重は地表面において半径 23 m の範囲内の等分布載荷、排水条件は各粘土層の上下面、およびモデル地盤右端面とした。土質定数は表-3に示す値を用い、弾性圧密計算を行った。

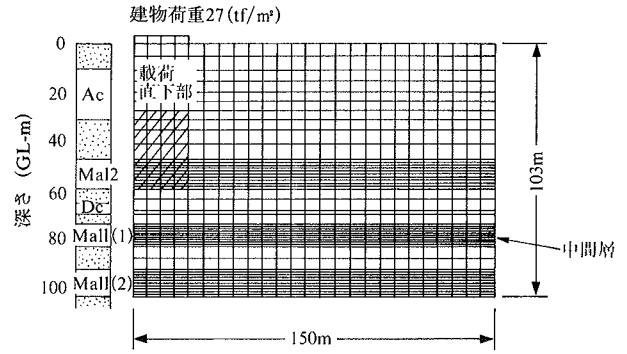


図-16 圧密解析モデル

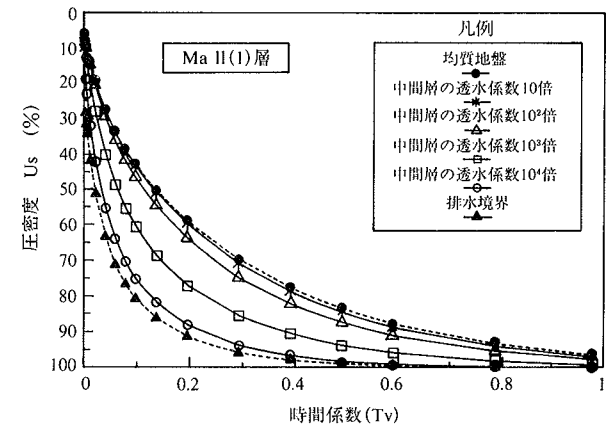


図-17 時間係数～圧密度関係 (透水係数の影響)

中間層の条件は、以下に示す透水係数と層厚を組合せて設定し、中間層の排水能力と沈下速度の関係について検討した。

- ① 透水係数：上下の粘性土の10¹, 10², 10³, 10⁴倍
- ② 層厚 : 0.9 m, 0.45 m, 0.23 m

3.4.2 解析結果 図-17に、中間層の層厚 0.9 m の時間係数 Tv～圧密度 Us の関係を示す。中間層の厚さが同じでも、中間層の透水係数が大きなモデル地盤ほど速く圧密が進行し、透水係数が10⁴倍のモデルでは中間層を排水境界に設定した結果に近い。

図-18に、過剰間隙水圧の鉛直分布、水平分布を示す。中間層の透水係数が大きいモデルほど中間層付近の過剰間隙水圧が小さくなっている。中間層の透水係数10⁴倍の結果における中間層の過剰間隙水圧の発生量は、中間層が無い場合の結果の10%程度と小さく、中間層全体が排水条件に近い状況となっていることがわかる。

図-19には、中間層の層厚のみを変化させた条件における時間係数～圧密度関係を示す。中間層の層厚が大きくなれば、同じ透水係数でも圧密に要する時間は短くなることがわかる。

図-20は、粘土層、中間層の透水係数の比と圧密時間 t₅₀, t₉₀ の関係を示したものである。図中には、2章で示した土質調査結果から推定した中間層の透水係数および層厚の範囲を付記した。中間層の層厚が 0.9 m の結果では、透水係数が10倍より大きくなると圧密時間が短くなり始める。透水係数の差が10²倍より大きくなると圧密

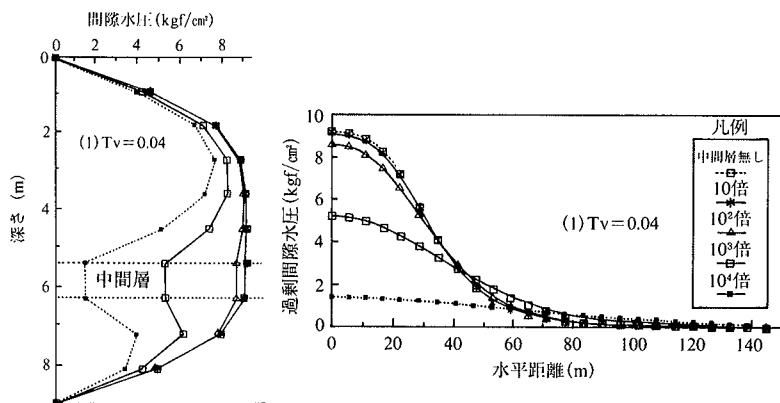


図-18 間隙水圧の鉛直・水平分布

時間に及ぼす影響も20%以上と比較的有為な差となっている。透水係数の差が 10^4 倍程度ではほぼ排水条件とした場合と同様の効果を発揮している。これに対して、中間層の層厚が薄い0.23mの結果では、10倍程度の差では圧密速度へ影響は無いものの、その効果は 10^2 倍以上の透水係数の差から現れ、 10^5 以上と大きな透水係数の差がある場合にはほぼ中間層を排水境界とした結果となる。中間層が薄い場合でも透水係数によっては圧密速度に大きく影響することがわかる。

一般的に排水層は 10^4 程度の透水係数の差が必要であることが吉国ら⁷⁾によって指摘されているが、図-20の関係から排水層としての条件は透水係数の条件以外に層厚の条件も必要で、 10^4 程度の透水係数の差で排水層として機能するには約0.9m以上の厚さが必要であることがわかる。

土質試験から得られた中間層の土性（透水係数の差が $10^2 \sim 10^3$ 倍、層厚が約0.9m）では、圧密時間が50~80%と速く進むことが予想される範ちゅうに入り、中間層の排水性の評価が重要な条件であることがわかる。

4. まとめ

この論文では、圧密変形挙動を対象として、初期応力状態と材料定数の組合せと層構成のモデル化における排水層の設定の影響についてシミュレーション解析を行い、以下の結論を得た。

① 粘性土を対象として実用的で精度が高いといわれている弾塑性構成式（修正カム・クレイ・モデル）を用いて、 K_0 圧密試験のシミュレーション解析を行った。修正カム・クレイ・モデルで理論的に存在する初期応力状態（ K_0 値）と強度定数（ M ）の1対1の関係は、室内試験結果と大きな差を示すことが多く、対照とした室内試験結果も同様の傾向を示した。室内試験から得られた M と K_0 値の両者を入力値としてシミュレーション解析を行った結果、解析の圧密量は試験を10~70%程度小さく評価することを指摘するとともに、入力パラメータ（ K_0 値、 M ）を変化させた解析結果から実用的に精度良い解析結果を得るための入力条件（ K_0 値と M ）の範囲を示した。

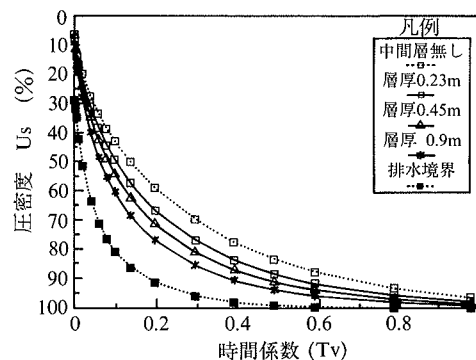


図-19 時間係数～圧密度関係 (層厚の影響)

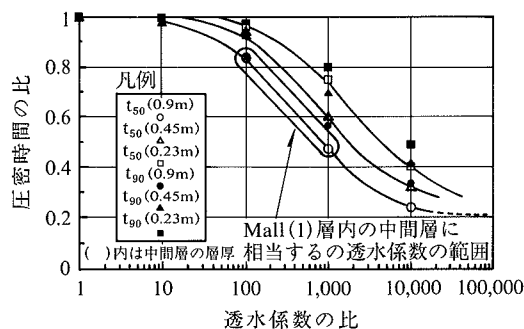


図-20 圧密時間の比較

② 洪積粘土層でよく見受けられるような粘土層内に透水性能が比較的大きな層（中間層）が介在するモデル地盤の圧密解析を行い、中間層の透水性が圧密時間に与える影響について検討した。解析の結果、中間層の透水係数と層厚さは圧密時間に大きく影響を与えることがわかった。その影響度合いは、例えば層厚を約1mとした場合、中間層の透水係数が粘土層に比べ 10^4 倍以上の場合は圧密時間が1/4とほぼ排水層に相当するほか、 10^3 倍で1/2、 10^2 倍で1/1.25となり、中間層の透水性が圧密速度に与える影響を定量的に示した。

参考文献

- 1) 土田, 他: 三軸試験機を用いた不覚乱粘土試料の K_0 圧密試験法について, 三軸試験方法に関するシンポジウム, (1991)
- 2) Roscoe, k.H., Burland, J.B.: In the generalized stress-strain behavior of 'WET' clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, (1968)
- 3) 土質工学関西支部: 関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム, (1992)
- 4) 土質工学関西支部: 関西地盤, (1992)
- 5) 及川: 大阪湾海底地盤 第9章ケーススタディー, 海底地盤調査指針, p. 261~305, (1990)
- 6) 土質工学会: 土質調査結果の解釈と適用例, 土質基礎工学ライブラリー4, 第1回改訂版
- 7) Yoshikuni H, Nakanodo H: Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, Soils and Foundations, vol. 14, No. 2, p. 35~46, (1974)